DOI:10.24850/j-tyca-2018-03-10

Nota

Análisis estadístico de la ocurrencia de sequías meteorológicas anuales según el tipo de clima del estado de San Luis Potosí, México

Statistical analysis of the occurrence of annual meteorological droughts according to climate type in the state of San Luis Potosi, Mexico

Daniel Francisco Campos-Aranda[1]

[1]Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, campos_aranda@hotmail.com

Autor para correspondencia: Daniel Francisco Campos-Aranda, campos_aranda@hotmail.com

Resumen

Las *sequías* son un fenómeno natural recurrente y regional, gobernado por los parámetros climáticos locales. Siendo la precipitación media anual la magnitud fundamental que define al clima, en este estudio se emplea para su clasificación y para identificar la *ocurrencia* de las sequías meteorológicas. Se procesaron 32 registros completos de precipitación anual del estado de San Luis Potosí, México, cuyas amplitudes variaron de 45 a 55 años. Tales series anuales definen cuatro climas y en ellas se aplica un modelo extremadamente simple de detección y estimación de la severidad de las sequías. Se obtienen los valores representativos por climas del porcentaje de ocurrencia de sequías (% *O*) y de su intensidad media (*IM*). En el clima árido, el % *O* representativo es de 26.9, con una *IM* de 0.446. En el clima semiárido, el % *O* baja a 22.2, con una *IM* de 0.379; en el clima subhúmedo, ambos indicadores descienden a 18.5 y 0.336. Por último, en el clima húmedo, el % *O* se reduce hasta 16.4, pero la *IM* aumenta ligeramente a 0.344. El análisis de las ocurrencias de las sequías en los años analizados permite formular conclusiones sobre su *distribución temporal*, por años y *espacial*, dentro del estado de San Luis Potosí, México. Dada la importancia de las estimaciones citadas, para entender

el comportamiento de las sequías meteorológicas de una región o estado se recomienda realizar estos análisis en otras regiones del país.

Palabras clave: precipitación anual, espectro climático, pruebas estadísticas, porcentaje de ocurrencias, severidad de sequías, déficit relativo de precipitación, años de sequía.

Abstract

Droughts are a regional and recurrent natural phenomenon, which is governed by local climatic parameters. Since the annual average precipitation is the fundamental quantity defining the climate, in this study it is used for the classification and the identification of the *occurrence* of meteorological droughts. Thirty-two complete annual rainfall records were processed from the state of San Luis Potosi, Mexico, whose amplitudes ranged from 45 to 55 years. These annual series define four climates, and an extremely simple model to detect and estimate the severity of droughts was applied to them. Two representative values of each climate were obtained: drought occurrence percentage (%O) and average intensity (*AI*). In the arid climate, the representative %O was 26.9, with a 0.446 *AI*. For the semiarid climate the %O decreased to 22.2 with an *AI* of 0.379. In the subhumid climate, both indicators fell, to 18.5 and 0.336, respectively. Lastly, in the humid climate the %O decreased to 16.4, but the *AI* increased slightly to 0.344. The analysis of the occurrences of droughts in the years analyzed enables drawing conclusions about their *temporal distribution*, yearly and spatially, within the state of San Luis Potosi, Mexico. Conducting these analyses in other regions of the country is recommended, due to the importance of those estimations in order to understand the behavior of meteorological droughts in a region or state.

Keywords: Annual precipitation, climate spectrum, statistical tests, percentage of occurrences, drought severity, relative precipitation deficit, drought years.

Recibido: 07/10/2016

Aceptado: 02/09/2017

Introducción

Las *sequías* son un fenómeno natural cíclico y regional que acontece en todas las localidades del mundo. Su ocurrencia y severidad está relacionada con los parámetros climáticos regionales. Entre los más impactantes están la *precipitación media anual* (*PMA*) y la *evapotranspiración potencial media anual* (*ETP*). La *PMA* depende principalmente de las siguientes ocho características geográficas: latitud; factores orográficos; corrientes oceánicas de mesoescala; circulación del viento atmosférico; proximidad de océanos y grandes lagos; presión atmosférica; color y textura de la superficie terrestre, y condicionantes atmosféricos de origen natural o de las actividades humanas. En cambio, la *ETP* depende de manera preponderante de las siguientes cuatro características atmosféricas y físicas: radiación solar neta, déficit de presión de vapor, rugosidad de la superficie e índice de área foliar (Ponce, Pandey & Ercan, 2000).

La *sequía meteorológica* de una localidad o región es el lapso de meses o años durante el cual la precipitación que ocurre es inferior a la que normalmente acontece. Las sequías de las zonas semiáridas y subhúmedas son las mejor documentadas debido a que en tales climas se tienen las mayores concentraciones de la población humana y, por lo tanto, las demandas son altas y más afectadas por las sequías. Lo contrario ocurre en los climas húmedos, donde la disponibilidad es superior a la demanda y, por ello, las sequías no tienen fuertes impactos negativos (Ponce *et al*., 2000; Mishra & Singh, 2010).

El *objetivo* de este estudio buscó cuantificar el número de sequías y su severidad media en cada uno de los cuatro climas que ocurren en el estado de San Luis Potosí, México. Para ello, se procesaron 32 registros de precipitación anual (*PA*) completos y de lapso amplio, pues variaron de 45 a 55 datos cada uno. Se aplicó el modelo más simple que define la *ocurrencia* de las sequías meteorológicas anuales, cuando la *PA* no excede el 75% de su valor medio anual (*PMA*) y que estima su *severidad* con base en el déficit relativo de precipitación, es decir: (*PMA* – *PA*)/*PMA*. Se analizan y discuten los resultados y se formulan las Conclusiones.

Datos procesados y métodos aplicados

Registros de precipitación anual seleccionados

Con base en el archivo en Excel de la información climatológica disponible en el estado de San Luis Potosí, proporcionado al autor por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), se seleccionaron las series cronológicas de *precipitación total mensual* que no tienen años faltantes y cuentan con registros amplios. Con tales restricciones se identificaron 32 estaciones climatológicas, con un número de años de registro, variando de 45 a 55 datos; sus nombres y características generales se exponen en la Tabla 1, y su localización geográfica en el estado se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Características generales y estadísticas en las series de precipitación anual (*PA*) de las 32 estaciones climatológicas con registro completo y más de 45 datos del estado de San Luis Potosí, México.

Núm.	**Nombre**	**Coordenadas[1]**			**Registro**		***PA* (mm)**		**Estadísticos[3]**					Grupo climático (según *PMA*)
		Lat.	**Long.**	**Alt.**	**Periodo**	***n*[2]**	**Mín.**	**Máx.**	***PMA***	**Mediana**	***DE***	***Cv***	r_1	
1	Vanegas	23° 53′	101° 57′	1746	1964–2015	52	52.5	713.7	287.6	279.4	124.4	0.432	0.253	Árido
2	Santa María del Refugio	23° 44′	101° 13′	2068	1964–2015	52	38.7	886.8	299.0	298.3	151.1	0.505	0.125	Árido
3	Reforma	22° 45′	101° 39′	2043	1965–2012	48	111.5	1041.31	347.3	322.4	162.8	0.469	0.009	Árido
4	Col. Álvaro Obregón	22° 15′	99° 40′	1146	1961–2014	54	83.0	752.0	348.3	349.7	145.9	0.419	0.231	Árido
5	La Maroma	23° 28′	100° 29′	1900	1965–2015	51	95.0	687.0	366.6	359.8	117.6	0.321	–0.077	Árido
6	Ojo Caliente	21° 53′	100° 49′	1789	1967–2015	49	191.4	816.9	378.2	347.9	124.9	0.330	–0.081	Árido
7	Los Filtros (SLP)	22° 09′	101° 01′	1904	1950–2014	65	169.6	657.2	384.6	378.9	111.5	0.290	0.018	Árido
8	El Peaje	22° 05′	101° 07′	2101	1963–2011	49	195.2	702.7	414.4	394.0	112.9	0.272	–0.027	Semiárido
9	El Grito	22° 40′	101° 08′	1850	1969–2013	45	178.6	672.1	424.5	423.3	131.8	0.310	–0.054	Semiárido
10	Charcas	23° 07′	101° 06′	2126	1962–2015	54	119.0	987.0	463.7	441.3	198.0	0.427	0.035	Semiárido
11	Ciudad del Maíz	22° 24′	99° 27′	1248	1969–2015	47	188.0	2232.1	595.8	514.3	395.1	0.663	0.385	Semiárido
12	Villa Juárez	22° 20′	100° 16′	1144	1963–2014	52	286.0	1017.2	605.6	598.0	169.1	0.279	0.067	Semiárido
13	Nogal Oscuro	22° 02′	100° 11′	1045	1965–2014	50	360.1	991.1	632.0	625.9	173.3	0.274	0.121	Semiárido
14	Rayón	22° 01′	99° 38′	1258	1961–2015	55	206.2	1177.9	634.6	616.5	198.4	0.313	0.145	Semiárido
15	Cerritos	22° 26′	100° 17′	1178	1965–2015	51	232.3	1161.5	694.4	698.1	180.5	0.260	–0.018	Semiárido
16	San Juan del Meco	22° 37′	99° 37′	1278	1961–2014	54	255.6	1289.8	794.4	769.4	235.0	0.296	0.010	Semiárido
17	Ébano	22° 13′	98° 22′	40	1961–2015	55	259.5	1318.3	861.9	850.0	228.8	0.265	0.114	Subhúmedo

18	El Tigre	22° 18′	99° 09′	183	1961–2014	54	588.0	1894.5	1099.2	1061.4	287.4	0.261	−0.004	Subhúmedo
19	Santa Rosa	22° 01′	99° 04′	96	1961–2014	54	620.5	2276.0	1266.4	1233.6	353.0	0.279	0.330	Subhúmedo
20	El Pujal	21° 51′	98° 56′	51	1961–204	54	747.2	2507.0	1341.3	1312.5	372.7	0.278	0.249	Subhúmedo
21	Micos	22° 07′	99° 10′	210	1961–2014	54	804.3	2506.3	1490.5	1427.4	367.4	0.246	0.223	Subhúmedo
22	Ballesmi	21° 45′	98° 58′	43	1961–2014	54	918.9	2955.3	1508.6	1436.0	423.9	0.281	0.247	Subhúmedo
23	Damián Carmona	22° 06′	98° 18′	342	1961–2014	54	826.6	2532.5	1554.9	1565.9	366.1	0.235	0.128	Subhúmedo
24	Gallinas	21° 54′	99° 15′	283	1961–2015	55	907.2	3013.6	1706.0	1646.8	460.3	0.270	0.194	Húmedo
25	Santa Cruz	21° 42′	99° 03′	67	1961–2015	55	1151.0	3020.6	1865.8	1835.0	467.8	0.251	0.240	Húmedo
26	Tierra Blanca	21° 15′	98° 52′	168	1961–2015	55	888.2	2828.0	1918.6	1914.5	451.4	0.235	0.098	Húmedo
27	Temamatla	21° 14′	98° 45′	120	1961–2015	55	1115.9	2998.0	1957.0	1877.7	445.8	0.228	−0.050	Húmedo
28	Requetemu	21° 25′	98° 53′	126	1961–2015	55	1299.0	3441.1	2099.8	2073.0	454.3	0.216	0.151	Húmedo
29	Tancuilín	21° 34′	99° 07′	100	1961–2015	55	1248.9	3555.8	2145.2	2085.7	539.4	0.251	0.335	Húmedo
30	Aquismón	21° 37′	99° 01′	68	1961–2015	55	959.2	3562.1	2270.7	2178.3	608.4	0.268	0.183	Húmedo
31	Xilitla	21° 23′	98° 59′	630	1964–2014	51	1554.5	3764.8	2691.4	2715.4	584.8	0.217	−0.031	Húmedo
32	Tamapatz	21° 34′	99° 05′	885	1966–2015	50	1837.0	4352.3	2813.4	2806.1	629.3	0.224	0.017	Húmedo

Simbología:

[1]Latitud norte y longitud oeste de Greenwich en grados y minutos; altitud en msnm.

[2]Número de datos (algunas veces igual al número de años) procesados.

[3]PMA = precipitación media anual de la serie, en milímetros.

Cv = coeficiente de variación (*Cv* = *PMA*/*DE*), adimensional.

DE = desviación estándar de la serie, en milímetros.

r_1 = coeficiente de correlación serial de orden uno, adimensional.

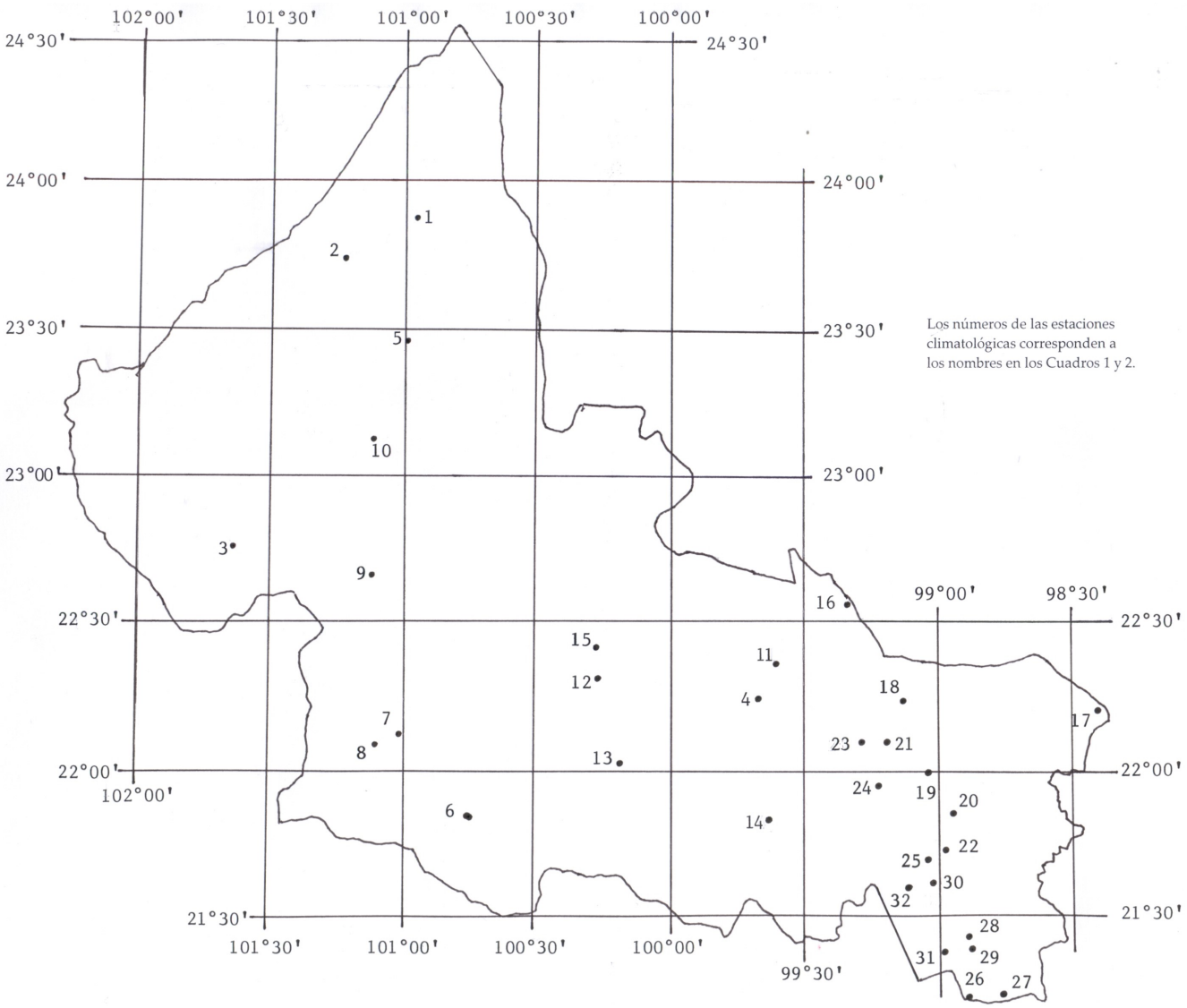

Figura 1. Localización geográfica de las 32 estaciones climatológicas procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

En cada registro y a partir de sus valores mensuales disponibles se obtuvieron las magnitudes de las *medianas* de la muestra, con las cuales se completaron los escasos años incompletos, por lo general, menos de tres; después se obtuvieron los valores anuales de precipitación (*PA*). Se adoptó la mediana por ser un estadístico que no está influenciado por los valores extremos de la serie. La media aritmética de los valores de *PA* es la *precipitación media anual* (*PMA*), que es el parámetro básico de clasificación de los 32 registros que serán procesados, cuyos valores estadísticos se muestran en la Tabla 1, según crece su magnitud de *PMA*.

Pruebas estadísticas aplicadas

En un estudio sobre la ocurrencia de las *sequías meteorológicas anuales*, las pruebas estadísticas deben buscar cambios en la media, que vuelvan al registro de *PA* no homogéneo; también resulta importante detectar tendencias en las series, para tenerlas identificadas y buscar las causas físicas que las originan. La ocurrencia de *persistencia* o autocorrelación en el registro no implica, en un estudio de sequías, ninguna dificultad o contrariedad para su procesamiento, pues tal componente es parte intrínseca de la serie cronológica. En este estudio de sequías meteorológicas se aplicaron siete pruebas estadísticas, una general contra componentes determinísticas no especificadas (test de Von Neumann) y seis específicas: dos de persistencia (pruebas de Anderson y Sneyers); dos de tendencia (tests de Kendall y Spearman); una de cambio en la media (prueba de Cramer), y una de variabilidad (prueba de Bartlett). Estas pruebas se pueden consultar en WMO (1971), Machiwal y Jha (2008), y Campos-Aranda (2015).

Espectro climático

Ponce, Pandey y Ercan (2000) clasifican los climas del planeta en ocho tipos, en función exclusivamente del cociente entre la *precipitación media anual* (*PMA*) y la *precipitación terrestre global anual* (*PTGA*). Para estimar esta última, indican que la cantidad de humedad almacenada en la atmósfera es función de la latitud y del clima, variando de 2 a 15 milímetros en las regiones polares y áridas a 45 a 50 mm en las húmedas. Un valor medio de 24 mm es adoptado para la estimación de la *PTGA*, además de considerar que la humedad atmosférica se recicla cada 11 días en promedio, por lo cual ocurren 33 ciclos en el año y entonces la *PTGA* es del orden de los 800 mm. Designando por *CP* al cociente entre la *PMA* y la *PTGA*, los ocho tipos de climas y sus límites numéricos se indican en la Figura 2.

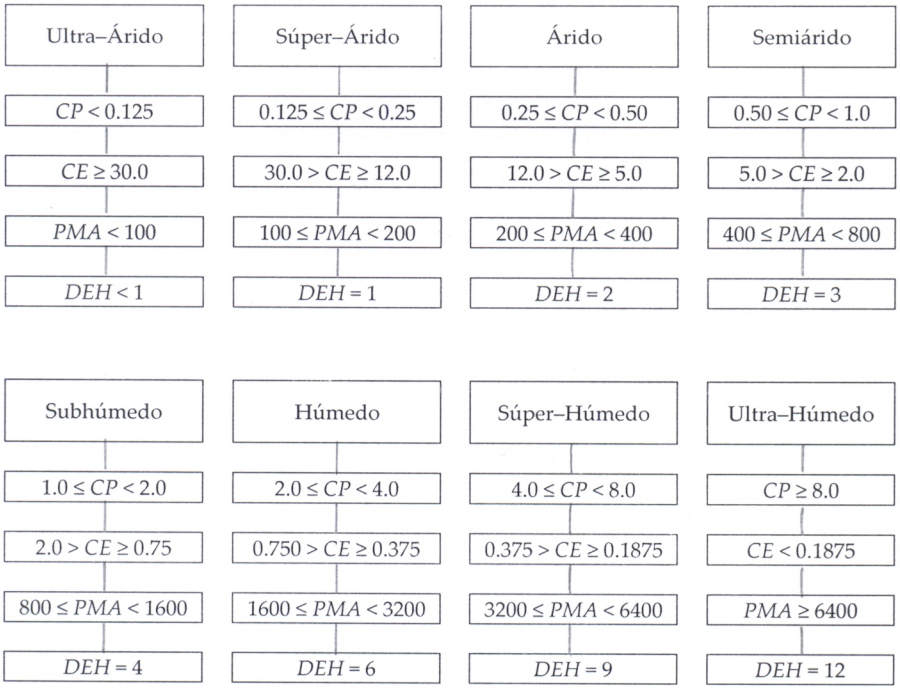

Figura 2. Grupos del espectro climático y sus límites de clasificación (Ponce *et al*., 2000; Pandey & Ramasastri, 2001; Pandey & Ramasastri, 2002).

Ponce *et al.* (2000) también establecen los límites para el cociente (*CE*) entre la evapotranspiración potencial media anual (*ETP*) y la *PMA*, para los ocho grupos de climas, y definen estos exclusivamente con base en la *PMA*, como se muestra en la Figura 2. Además, indican las *duraciones de la época húmeda* (*DEH*) en meses. Con base en el valor de *PMA* de la Tabla 1, se indica en su columna final el grupo climático de cada estación climatológica procesada.

Técnica elemental de detección de sequías

Según Pandey y Ramasastri (2001, 2002), cuando en un año su precipitación (*PA*) es menor de 75% de la media anual (*PMA*) ha ocurrido una sequía. Entonces, L1 = 0.75·*PMA* establece el límite superior de las sequías moderadas y el inferior será L2 = 0.625·*PMA*; de manera que un límite final L3 = 0.375·*PMA* define el umbral inferior de las sequías severas y es también el límite superior de las sequías

extremas. Lo anterior intenta cumplir con la condición de sequías que ocurren con *PA* < L1 y con sus tipos, los cuales de acuerdo con Ponce *et al.* (2000) establecen que las sequías moderadas tienen *PA*/*PMA* = 0.75, las severas *PA*/*PMA* = 0.50 y las extremas *PA*/*PMA* = 0.25.

Indicadores de ocurrencia y severidad de las sequías

El número de sequías (*NS*) anuales (*PA* < L1) dividido entre el tamaño (*n*) de la serie de *PA* y expresado en porcentaje es en realidad su *probabilidad de ocurrencia* (% *O*), al ser el cociente entre el número de casos favorables al número de casos posibles, es decir:

$$\% O = \frac{NS}{n} 100 \quad (1)$$

Pandey y Ramasastri (2001, 2002) emplean el recíproco (*n*/*NS*) y lo designan *periodo de retorno promedio* (*PRP*) de las sequías en años. El indicador de severidad de las sequías es su *intensidad media* (*IM*), definida (Ponce *et al*., 2000) como el déficit relativo medio, esto es:

$$IM = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} \frac{(PMA - PA_i)}{PMA} \quad (2)$$

Análisis y discusión de resultados

Resultados de las pruebas estadísticas

Diez registros de *PA* no resultaron plenamente homogéneos. En las estaciones Reforma y Ciudad del Maíz se detectó exceso de variabilidad con la prueba de Bartlett debido a la presencia de su valor máximo extremo. Los nueve registros de *PA* de las estaciones: Vanegas, Col.

Álvaro Obregón, Ciudad del Maíz, Santa Rosa, El Pujal, Micos, Ballesmi, Santa Cruz y Tancuilín resultaron no aleatorios de acuerdo con el test de Von Neumann y con persistencia en las pruebas respectivas. Por último, exclusivamente en la estación Ciudad del Maíz se detectó tendencia descendente, sin cambio en la media, según prueba de Cramer. No habiendo evidencia de cambio en la media o de pérdida de homogeneidad, excepto por persistencia, los 32 registros de *PA* se consideran aceptables para un estudio de sequías meteorológicas anuales.

Ocurrencia de las sequías (número e intensidad media por clima)

Las aseveraciones siguientes, de carácter general, se han formulado con base en los valores *medianos* de los resultados, mostrados en la Tabla 2. En el clima árido, el porcentaje de ocurrencias (% *O*) representativo es del 26.9, con una intensidad media (*IM*) de 0.446. En el clima semiárido, el % *O* baja a 22.2, con una *IM* de 0.379; en el clima subhúmedo, ambos indicadores descienden a 18.5 y 0.336. Por último, en el clima húmedo, el % *O* se reduce hasta 16.4, pero la *IM* aumenta ligeramente a 0.344.

Tabla 2. Límites adoptados para las sequías meteorológicas anuales, sus tipos e indicadores de ocurrencia en las 32 estaciones climatológicas procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

No.	**Nombre**	**Sequías (*PA* < L1 = 0.75·*PMA*)**				**Moderadas (L1 > *PA* > L2 = 0.625·*PMA*)**				**Severas (L2 > *PA* > L3 = 0.375·*PMA*)**				**Extremas (*PA* < L3)**		
		L1	**No.**	**% *O***	***IM***	**L2**	**No.**	**% *O***	***IM***	**L3**	**No.**	**% *O***	***IM***	**No.**	**% *O***	***IM***
1	Vanegas	215.7	14	26.9	0.499	179.8	3	21.4	0.346	107.9	8	57.1	0.473	3	21.4	0.721
2	Santa María del Refugio	224.3	16	30.8	0.532	186.9	1	6.2	0.254	112.1	11	68.8	0.484	4	25.0	0.736
3	Reforma	260.4	14	29.2	0.446	217.0	7	50.0	0.314	130.2	4	28.6	0.516	3	21.4	0.661
4	Col. Álvaro Obregón	261.2	17	31.5	0.461	217.7	7	41.2	0.317	130.6	8	47.1	0.512	2	11.8	0.757
5	La Maroma	275.0	10	19.6	0.439	229.1	4	40.0	0.307	137.5	5	50.0	0.483	1	10.0	0.741
6	Ojo Caliente	283.7	12	24.5	0.339	236.4	8	66.7	0.296	141.8	4	33.3	0.424	0	0.0	–
7	Los Filtros (SLP)	288.4	14	21.5	0.381	240.4	7	50.0	0.302	144.2	7	50.0	0.460	0	0.0	–

Valor mediano		–	–	26.9	0.446	–	–	41.2	0.307	–	–	50.0	0.483	–	11.8	0.736
8	El Peaje	310.8	10	20.4	0.330	259.0	9	90.0	0.308	155.4	1	10.0	0.529	0	0.0	–
9	El Grito	318.4	12	26.7	0.390	265.3	7	58.3	0.329	159.2	5	41.7	0.476	0	0.0	–
10	Charcas	347.8	18	33.3	0.447	289.8	8	44.4	0.306	173.9	7	38.9	0.508	3	16.7	0.678
11	Ciudad del Maíz	446.9	15	31.9	0.435	372.4	6	40.0	0.300	223.4	7	46.7	0.479	2	13.3	0.683
12	Villa Juárez	454.2	9	17.3	0.402	378.5	4	44.4	0.314	227.1	5	55.6	0.472	0	0.0	–
13	Nogal Oscuro	474.0	11	22.0	0.325	395.0	8	72.7	0.295	237.0	3	27.3	0.404	0	0.0	–
14	Rayón	476.0	11	20.0	0.379	396.6	6	54.5	0.287	238.0	4	36.4	0.442	1	9.1	0.675
15	Cerritos	520.8	8	15.7	0.379	434.0	5	62.5	0.313	260.4	2	25.0	0.401	1	12.5	0.665
16	San Juan del Meco	595.8	12	22.2	0.365	496.5	9	75.0	0.315	297.9	2	16.7	0.430	1	8.3	0.678
Valor mediano		–	–	22.0	0.379	–	–	58.3	0.308	–	–	36.4	0.472	–	8.3	0.678
17	Ébano	646.4	10	18.2	0.382	538.7	6	60.0	0.315	323.2	3	30.0	0.408	1	10.0	0.699
18	El Tigre	824.4	8	14.8	0.357	687.0	6	75.0	0.325	412.2	2	25.0	0.451	0	0.0	–
19	Santa Rosa	949.8	11	20.4	0.341	791.5	7	63.6	0.292	474.9	4	36.4	0.427	0	0.0	–
20	El Pujal	1006.0	10	18.5	0.336	838.3	8	80.0	0.313	503.0	2	20.0	0.429	0	0.0	–
21	Micos	1117.9	9	16.7	0.311	931.6	8	88.9	0.292	559.0	1	11.1	0.460	0	0.0	–
22	Ballesmi	1131.4	11	20.4	0.309	942.8	8	72.7	0.280	565.7	3	27.3	0.387	0	0.0	–
23	Damián Carmona	1166.2	10	18.5	0.323	971.8	8	80.0	0.288	583.1	2	20.0	0.461	0	0.0	–
Valor mediano		–	–	18.5	0.336	–	–	75.0	0.292	–	–	25.0	0.429	–	0.0	–
24	Gallinas	1279.5	11	20.0	0.347	1066.2	7	63.6	0.310	639.7	4	36.4	0.411	0	0.0	–
25	Santa Cruz	1399.4	11	20.0	0.317	1166.1	10	90.9	0.310	699.7	1	9.1	0.383	0	0.0	–
26	Tierra Blanca	1439.0	9	16.4	0.349	1199.1	7	77.8	0.312	719.5	2	22.2	0.477	0	0.0	–
27	Temamatla	1467.8	6	10.9	0.347	1223.1	4	66.7	0.313	733.9	2	33.3	0.414	0	0.0	–
28	Requetemu	1574.9	8	14.5	0.306	1312.4	7	87.5	0.296	787.4	1	12.5	0.381	0	0.0	–
29	Tancuilín	1608.9	9	16.4	0.344	1340.8	6	66.7	0.317	804.5	3	33.3	0.399	0	0.0	–
30	Aquismón	1703.0	9	16.4	0.354	1419.2	6	66.7	0.289	851.5	3	33.3	0.484	0	0.0	–
31	Xilitla	2018.6	10	19.6	0.320	1682.1	7	70.0	0.288	1009.3	3	30.0	0.394	0	0.0	–
32	Tamapatz	2110.0	6	12.0	0.296	1758.4	6	100.0	0.296	1055.0	0	0.0	–	0	0.0	–
Valor mediano		–	–	16.4	0.344	–	–	70.0	0.310	–	–	30.0	0.405	–	0.0	–

Sólo en los climas árido y semiárido ocurren sequías extremas. En el clima árido, los % *O* y sus *IM* de sequías moderadas, severas y extremas resultaron ser los siguientes: 41.2 con 0.307, 50.0 con 0.483 y 11.8 con 0.736. Estos mismos indicadores en el clima semiárido son 58.3 con 0.308, 36.4 con 0.472 y 8.3 con 0.678. Por último, en el clima subhúmedo, el % *O* y su *IM* de las sequías moderadas y severas fueron 75.0 con 0.292 y 25.0 con 0.429; y para el clima húmedo: 70.0 con 0.310 y 30.0 con 0.405.

Los % *O* de sequías de cada clima equivalen a los siguientes periodos de retorno promedio: en el clima árido se tiene *PRP* = 3.8 años; en el semiárido, *PRP* = 4.3 años; en el subhúmedo, *PRP* = 5.5 años; por último, en el húmedo *PRP* = 6.2 años. Pandey y Ramasastri (2001; 2002) reportan para India, al procesar 95 estaciones climatológicas con registros que variaron de 65 a 89 años, que en el clima árido el *PRP* varía de 2 a 3 años; en el clima semiárido, el *PRP* fluctúa de 3 a 5 años; por último, en el clima subhúmedo, el *PRP* oscila de 5 a 8 años. Entonces, los resultados obtenidos en el estado de San Luis Potosí, México, para la ocurrencia de las sequías coinciden de manera aproximada con los obtenidos en India.

Se observa que el *PRP* del clima húmedo de San Luis Potosí, México, está ubicado en el intervalo que encuentran Pandey y Ramasastri (2001; 2002) para el clima subhúmedo de India, concluyendo que debería ser mayor. Tal anomalía seguramente es ocasionada por la mayor regularidad de la precipitación en los climas húmedos en la India, originados por el monzón.

Evolución de la severidad de las sequías con la *PMA*

En la Figura 3 se han dibujado en el eje de las ordenadas los 32 valores de la intensidad media (*IM*) de las sequías, tomadas de la columna 6 de la Tabla 2, contra sus respectivas abscisas de *PMA* en milímetros, obtenidas de la columna 10 de la Tabla 1. Se observa que existen tres puntos (estaciones 6, 8 y 13) que se apartan del comportamiento general de tipo hiperbólico y por ello se eliminaron. Tales puntos corresponden a las estaciones climatológicas Ojo Caliente, El Peaje y Nogal Oscuro. El ajuste de mínimos cuadrados de los residuos conduce a la ecuación mostrada en la Figura 3, cuyo coeficiente de correlación lineal resultó de 0.8947, con un error estándar de la estimación de 0.0696. La curva hiperbólica se considera representativa en el intervalo

de *PMA* de 300 a 1 400 milímetros; por ello sus extremos se han dibujado punteados.

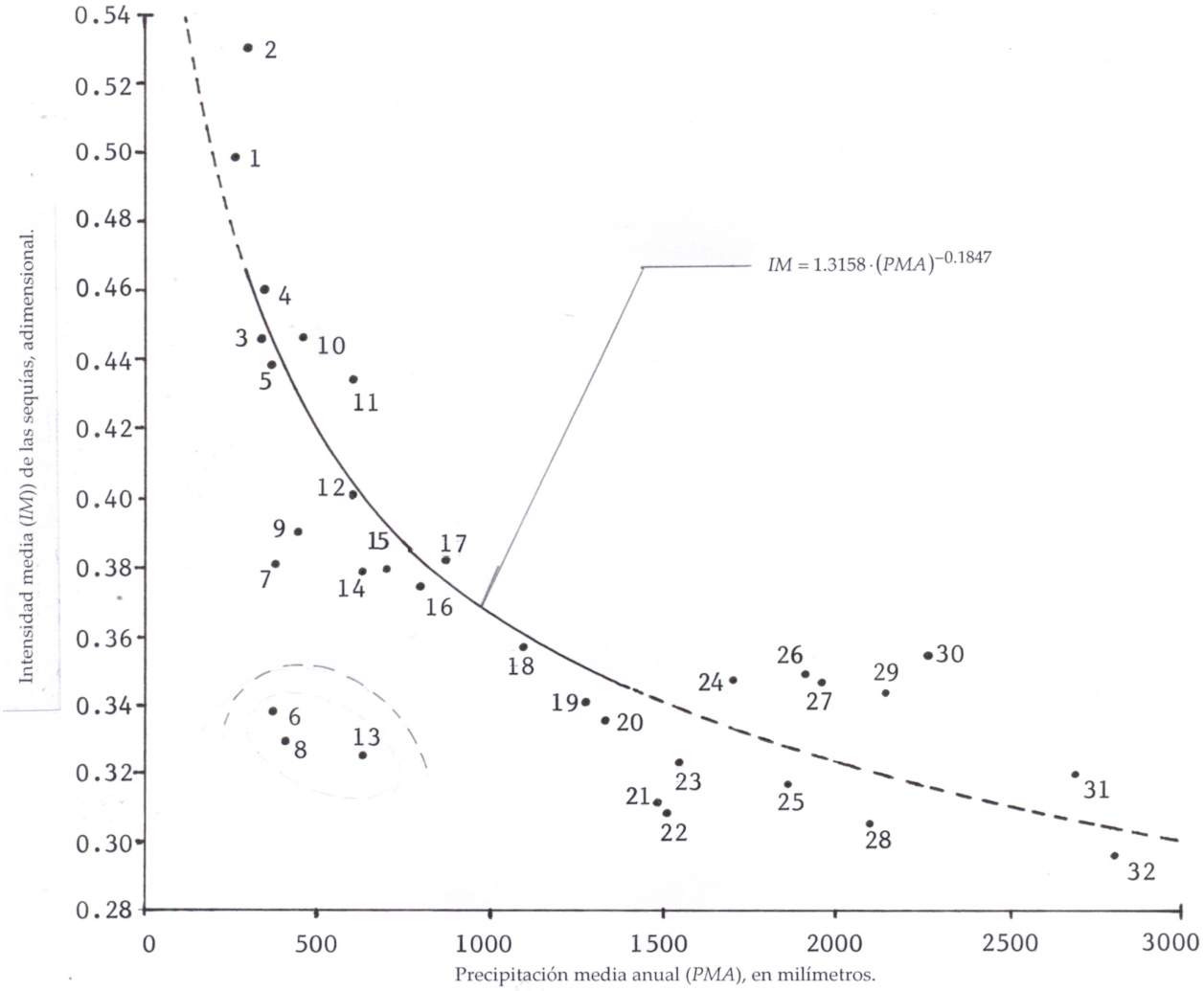

Figura 3. Evolución de la intensidad media de las sequías con la precipitación media anual en las 32 estaciones climatológicas procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

Ocurrencia de las sequías (tipos por año)

En la Tabla 3a se han indicado por años la ocurrencia de cada tipo de sequía en la primera mitad (1961-1988) del periodo de análisis, en las 32 estaciones climatológicas procesadas. En la Tabla 3b se tienen las ocurrencias de los tipos de sequías en la segunda mitad (1989-2015).

Se observa que en el primer lapso, que abarca 28 años, se tiene un total de 160 ocurrencias de sequías, y en la segunda mitad, que comprende 27 años, se presentaron 188 sequías; por lo anterior, se concluye con este análisis que la ocurrencia de sequías ha aumentado en las décadas recientes en el estado de San Luis Potosí, México.

Tabla 3a. Tipos de sequías en el periodo 1961-1988 de las 32 estaciones procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

Est.	**28 años de 1900:**																											
	61	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**	**68**	**69**	**70**	**71**	**72**	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**	**79**	**80**	**81**	**82**	**83**	**84**	**85**	**86**	**87**	**88**
Vanegas				↦										SE	SS		SS											
Santa M. del Refugio				↦					SS					SE	SS		SS		SM								SS	SE
Reforma					↦				SM					SM			SM		SM				SM			SM		
Col. Álvaro Obregón	↦	SM	SS	SE													SM	SE	SS		SS	SS	SS	SS	SS	SS		
La Maroma					↦				SM	SS				SE									SM					
Ojo Caliente							↦							SM						SS		SM	SM					
Los Filtros (SLP)	↦	SM												SS						SM			SM					
El Peaje			SS											SM			SM			SM		SM	SM					
El Grito									SS					SM				SM	SM	SM								
Charcas		SM		SM	SM				SE					SS	SM		SS		SS	SM		SE	SS					
Ciudad del Maíz									↦											SM							SS	
Villa Juárez			↦	SS	SS								SM	SS											SM			
Nogal Oscuro					↦						SM								SS		SM							SM
Rayón	↦	SS	SE																			SM			SM	SM		

Cerritos					SE									SM						SM							
San Juan del Meco	↦																			SM		SS					SE	
Ébano	↦		SM	SS													SS			SM		SS						
El Tigre	↦	SM		SM																SS		SM						
Santa Rosa	↦	SS																	SM	SS		SS					SM	SM
El Pujal	↦	SS	SM	SM															SM			SS					SM	
Micos	↦		SM																SM	SS							SM	SM
Ballesmi	↦	SS	SM	SM															SM	SM		SM					SS	
Damián Carmona	↦	SM	SM																SM	SM		SS	SS					
Gallinas	↦	SM															SS		SM	SS		SS					SM	
Santa Cruz	↦	SM	SM	SM													SM		SM			SM					SM	
Tierra Blanca	↦	SM															SM			SM		SS						
Temamatla	↦																SS			SM		SM						
Requetemu	↦		SM														SS					SM					SM	
Tancuilín	↦																SM					SS						
Aquismón	↦	SS	SS																SM			SM					SM	
Xilitla				SM													SS			SM		SM						
Tamapatz						↦														SM		SM						
Sumas por años	0	13	11	9	3	0	0	0	5	1	1	0	1	11	3	0	14	2	14	19	2	21	8	1	3	3	11	4

Simbología: ↦ = inicio del registro; SM = sequía moderada; SS = sequía severa; SE = sequía extrema.

Tabla 3b. Tipos de sequías en el periodo de 1989 a 2015 de las 32 estaciones procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

Est.	27 años de 1900 y del 2000:																										
	89	**90**	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**	**98**	**99**	**2000**	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**	**06**	**07**	**08**	**09**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Vanegas	SS				SM	SE	SE	SS		SM	SM	SS	SS										SS	SS			
Santa M. del Refugio	SS									SS	SS		SS				SS	SS	SE				SE	SS			
Reforma	SS							SE			SE	SE	SM				SS					SS	SS				
Col. Álvaro Obregón				SM			SM									SM	SM						SM				
La Maroma	SS				SM			SS		SM	SS												SS				
Ojo Caliente	SS				SM			SM			SS	SS	SM				SM						SM				
Los Filtros (SLP)	SS						SM	SM				SS	SM										SS	SS			
El Peaje	SM											SM					SM						SM				
El Grito	SS									SS		SS	SM				SM			SM			SS				
Charcas	SM					SS	SE				SS	SM											SM	SS			
Ciudad del Maíz	SS					SS	SM	SM			SE	SS	SM	SS				SM			SS	SE	SM	SS			
Villa Juárez	SM						SS																	SM		SS	
Nogal Oscuro						SM						SM		SM		SM				SM		SS	SS				
Rayón						SM	SS							SM				SS			SM			SS			
Cerritos							SS				SS	SM					SM							SM			
San Juan del Meco	SM			SM		SS				SM	SM							SM			SM			SM	SM		
Ébano								SM	SM	SM			SM										SE				
El Tigre	SM					SM												SM			SS						
Santa Rosa											SM	SM		SM			SM	SS									
El Pujal							SM					SM						SM					SM				
Micos											SM							SM			SM		SM				
Ballesmi							SM	SM	SM								SS										

Damián Carmona									SM								SM				SM		SM				
Gallinas	SS					SM		SM	SM									SM									
Santa Cruz		SM							SS			SM		SM													
Tierra Blanca									SS			SM		SM	SM			SM									
Temamatla									SM					SS				SM									
Requetemu												SM		SM				SM					SM				
Tancuilín								SM			SM	SS		SM	SS			SM					SM				
Aquismón								SM	SM									SM					SS				
Xilitla								SM	SM			SM		SM				SS					SS				
Tamapatz								SM	SM				SM														SM
Sumas por años	14	1	0	2	3	8	10	13	10	6	12	17	9	10	2	2	10	15	1	2	6	3	20	9	1	1	1

Simbología: ↦ = inicio del registro; SM = sequía moderada; SS = sequía severa; SE = sequía extrema.

Habiendo procesado 32 estaciones climatológicas, los años con 20 ocurrencias de sequías corresponden a años de sequía generalizada en el estado, tal es el caso de 1980, 1982 y 2011 de manera preponderante, y los años de 1977, 1979, 1996, 2000 y 2006, con menor contundencia.

Por otra parte, los años con sequías generalizadas en los climas árido y semiárido del Altiplano Potosino y la Zona Media son 1974, 1983, 1989, 1999 y 2011. En cambio, los años con sequías generalizadas en los climas subhúmedo y húmedo de la Región Huasteca son 1962, 1963, 1980, 1982, 1997, 2002 y 2006.

Conclusiones

Este estudio demostró que a mayor variabilidad en la precipitación anual se origina una mayor ocurrencia de sequías y una intensidad media

mayor en ellas, según resultados de la Tabla 2. El decaimiento en la variabilidad de la precipitación anual se puede apreciar con base en su coeficiente de variación (*Cv*) de la columna 13 de la Tabla 1.

En la Figura 3, resultante de este estudio y exclusivamente con el valor de la precipitación media anual de una localidad en el estado de San Luis Potosí, México, se puede obtener una estimación de la *intensidad media* (*IM*) de sus sequías meteorológicas anuales. Como complemento, en la Tabla 2 se exponen, por climas del estado, los valores representativos (medianos) del porcentaje de ocurrencias de sequías y de su *IM*.

Las ocurrencias de las *sequías* en los años analizados permiten formular conclusiones sobre su *distribución temporal*, por años y *espacial*, dentro del estado de San Luis Potosí, México. De la Tabla 3 se concluyó que en las décadas recientes ocurren más sequías, y que los años de sequía generalizada fueron 1980, 1982 y 2011 de manera preponderante, y los años de 1977, 1979, 1996, 2000 y 2006 con menor área abarcada.

Agradecimientos

Se agradecen los comentarios constructivos y las observaciones críticas del árbitro anónimo 1, las cuales permitieron volver más explícito el trabajo y acotar su alcance.

Referencias

Campos-Aranda, D. F. (2015). Búsqueda del cambio climático en la temperatura máxima de mayo en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 143-160.

Machiwal, D., & Jha, M. K. (2008). Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 353-366.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.

Pandey, R. P., & Ramasastri, K. S. (2001). Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency. *Hydrological Processes*, 15(6), 1019-1032.

Pandey, R. P., & Ramasastri, K. S. (2002). Incidence of droughts in different climatic regions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S), S31-S40.

Ponce, V. M., Pandey, R. P., & Ercan, S. (2000). Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 222-224.

World Meteorological Organization, WMO. (1971). Annexed III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations. In: *Climatic Change* (pp. 58-71) (Technical Note No. 79). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.